

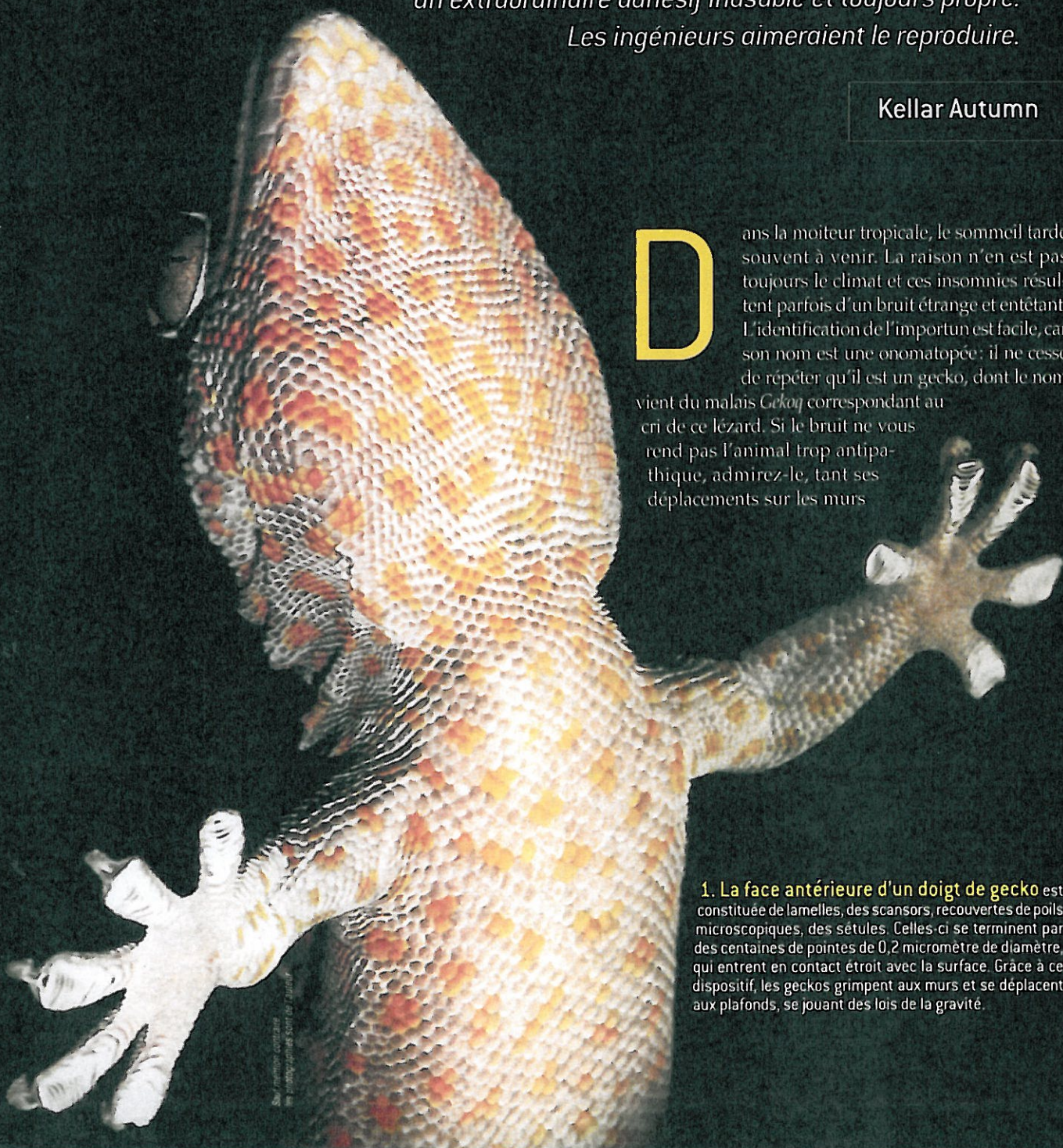
L'inusable adhésif des pattes du gecko

Les doigts des geckos sont recouverts de poils microscopiques qui, grâce aux forces de Van der Waals, constituent un extraordinaire adhésif inusable et toujours propre. Les ingénieurs aimeraient le reproduire.

Kellar Autumn

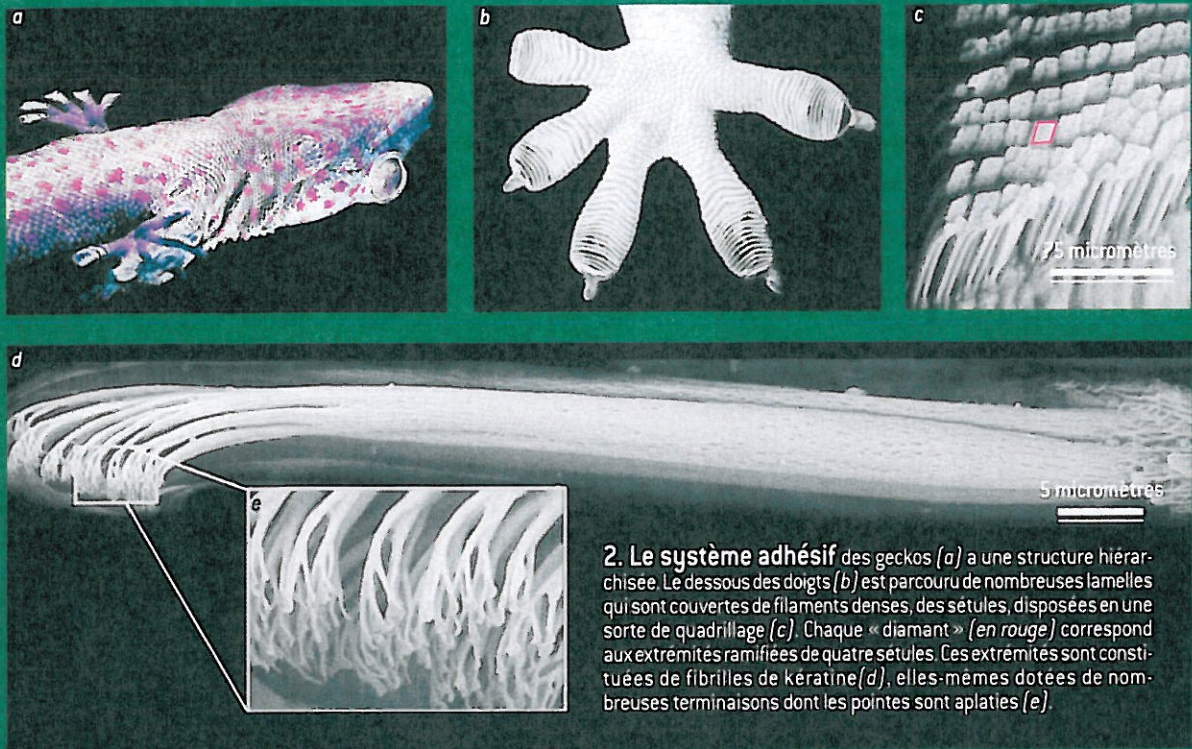
Dans la moiteur tropicale, le sommeil tarde souvent à venir. La raison n'en est pas toujours le climat et ces insomnies résultent parfois d'un bruit étrange et entêtant. L'identification de l'importun est facile, car son nom est une onomatopée: il ne cesse de répéter qu'il est un gecko, dont le nom vient du malais *Cekak* correspondant au cri de ce lézard. Si le bruit ne vous rend pas l'animal trop antipathique, admirez-le, tant ses déplacements sur les murs

1. La face antérieure d'un doigt de gecko est constituée de lamelles, des scansors, recouvertes de poils microscopiques, des sétules. Celles-ci se terminent par des centaines de pointes de 0,2 micromètre de diamètre, qui entrent en contact étroit avec la surface. Grâce à ce dispositif, les geckos grimpent aux murs et se déplacent aux plafonds, se jouant des lois de la gravité.



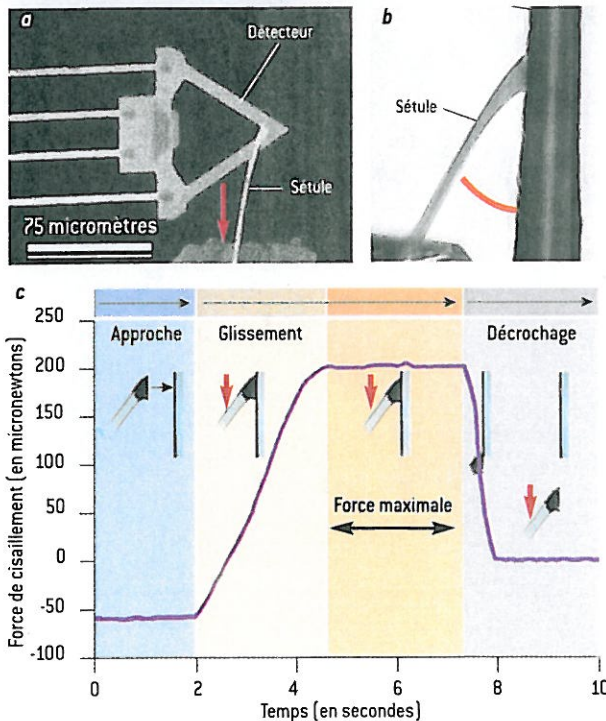


Andrew Sykes Science Photo Library



2. Le système adhésif des geckos (a) a une structure hiérarchisée. Le dessous des doigts (b) est parcouru de nombreuses lamelles qui sont couvertes de filaments denses, des sétules, disposées en une sorte de quadrillage (c). Chaque « diamant » (en rouge) correspond aux extrémités ramifiées de quatre sétules. Ces extrémités sont constituées de fibrilles de kératine (d), elles-mêmes dotées de nombreuses terminaisons dont les pointes sont aplaties (e).

Avec l'aimable autorisation de Mark Morlett, de Sas Gob et de l'auteur



3. La force de cisaillement (parallèle à la surface de contact) est mesurée grâce à un microdétecteur électromécanique (a) sur lequel adhère une sétule que l'on tire parallèlement à la surface du détecteur (flèches rouges). L'angle (b, en orange) entre cette sétule et la surface est critique pour déterminer cette force : quand cet angle est supérieur à 30 degrés, la sétule se détache. Les données recueillies (c) représentent la force de cisaillement en fonction du temps. Les flèches noires indiquent la direction de la force appliquée à la sétule. La force maximale observée est de 200 micronewtons, soit 32 fois la force prédite par des mesures effectuées sur l'animal entier.

et au plafond sont déconcertants. Comment un animal de cette taille (environ 20 centimètres) peut-il faire aussi bien qu'une minuscule mouche? Grâce à ses doigts remarquables (voir la figure 1), dont la structure constitue un adhésif efficace.

Efficace? Les doigts des geckos collent à presque tous les matériaux dans presque toutes les conditions (même sous l'eau ou dans le vide), sans se salir ni coller les uns aux autres. Les geckos attachent et détachent leurs doigts en quelques millisecondes tandis qu'ils se meuvent sur des surfaces lisses verticales ou à l'envers, un exploit qu'aucun adhésif classique ne peut égaler. En outre, à l'inverse des autres adhésifs, les doigts des geckos ne se dégradent pas. Nous étudions ces animaux depuis plus de dix ans et nous présenterons ici nos derniers travaux.

Des petits doigts très collants

Le coussinet d'un doigt de gecko (voir la figure 2) est constitué d'une série de lamelles, nommées scansors, qui sont couvertes de fibres souples, des sétules. Celles d'un gecko tokay (*Gekko gecko*) mesurent environ 110 micromètres de longueur et 4,2 micromètres de largeur. Ces sétules se ramifient elles-mêmes en centaines de branches, chacune se terminant par une mince spatule triangulaire. L'extrémité mesure environ 0,2 micromètre de longueur et autant de largeur.

Le gecko tokay est la plus étudiée des espèces de gecko (et l'une des plus grandes), mais cette famille compte plus d'un millier de représentants, dont les spatules, les sétules, les scansors et les doigts varient aussi bien en forme qu'en taille. Certains geckos sont même équipés de sétules sur la queue. Par ailleurs, des structures semblables se sont développées indépendamment chez d'autres familles de lézards.

Des études préliminaires avaient montré que l'adhérence du gecko résulte de phénomènes mécaniques plutôt que chimiques. Cependant, en 2001, avec Robert Full et Ronald Fearing, de l'Université de Berkeley, et Thomas Kenny, de l'Université Stanford, nous avons mesuré la force adhésive (qui résiste à la traction) et la force de cisaillement (qui s'oppose au glissement) d'une sétule isolée : nos premières valeurs étaient systématiquement trop faibles pour expliquer l'adhérence. Alors, phénomènes mécaniques, certes, mais lesquels ? La solution est venue quand nous avons compris le rôle des mouvements spécifiques dans l'adhérence de la sétule : sans surprise, les mouvements les plus efficaces reproduisent le mouvement des pattes d'un gecko qui grimpe. En appuyant légèrement la sétule sur la surface – on exerce alors une force de précharge –, la force de cisaillement mesurée, de l'ordre de 40 micronewtons, est six fois la force prédite par les mesures globales sur l'animal (20,1 newtons pour les deux pattes antérieures). Cette force atteint 200 micronewtons lorsqu'on combine la précharge à un déplacement de cinq micromètres vers l'arrière (une traction). Ainsi, l'adhérence est maximale quand la patte se pose, s'appuie et se rétracte (voir la figure 3).

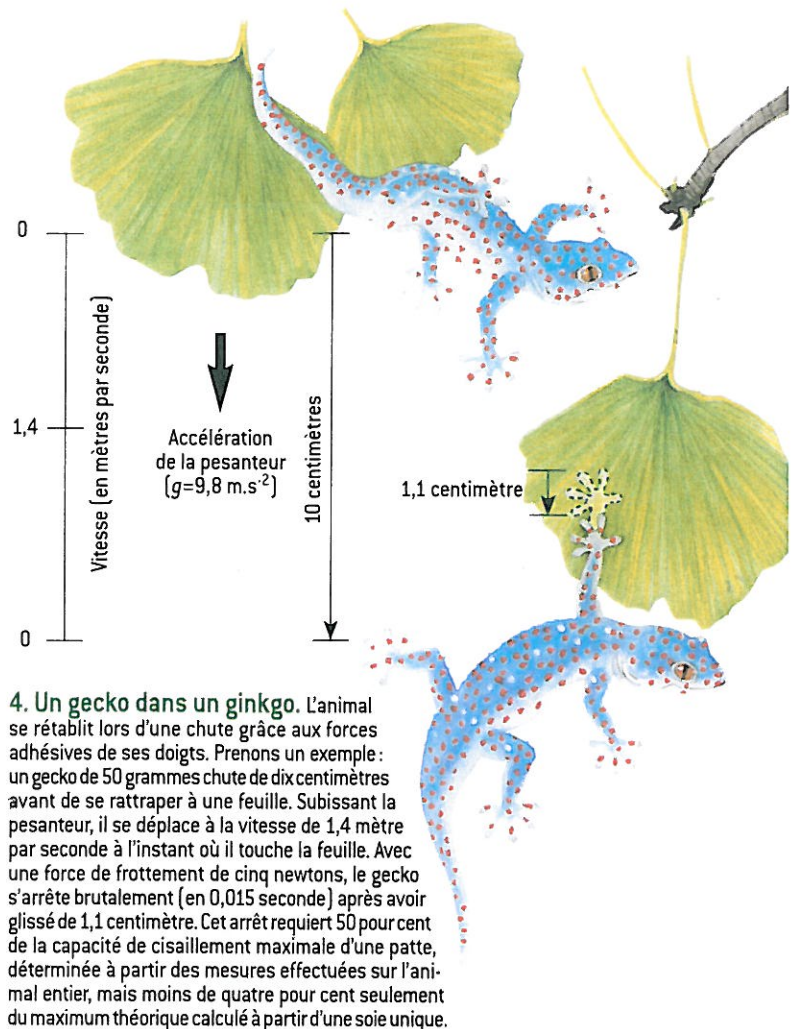
Une marge de sécurité

En théorie, les 6,5 millions de sétules d'un gecko tokay supporteraient le poids de deux personnes (une force de cisaillement égale à 1 300 newtons). Les geckos n'utiliseraient donc que trois pour cent de leurs sétules pour créer la force la plus intense mesurée sur l'animal entier. Mieux, un gecko de 50 grammes n'a besoin que de 0,04 pour cent de ses sétules (à leur maximum d'adhérence) pour soutenir sa masse. La marge de sécurité des pieds de gecko semble surdimensionnée.

En pratique, elle ne l'est sans doute pas autant, car les sétules ne s'orientent pas toutes dans la même direction en même temps. De plus, de nombreuses spatules ne sont pas en contact avec la surface quand elle est irrégulière ou poussiéreuse. Cette « réserve d'adhérence » n'est pas du gaspillage, puisqu'elle est mise à contribution par les geckos pour résister à des tempêtes, aux prédateurs, ou bien pour reprendre prise après une chute. En effet, quand les geckos tombent (voir la figure 4), ils peuvent s'arrêter en rattachant au vol leurs doigts à un nouveau support ; un tel rétablissement sollicite une grande part de la marge de sécurité.

Avec de telles forces mises en œuvre dans l'adhérence, comment les geckos lèvent-ils leur pied aussi rapidement (en 15 millisecondes) ? Il y a quelques années, nous avons montré que l'augmentation de l'angle (au-delà de 30 degrés) formé par l'axe de la sétule et le substrat conduit au détachement. Quand cet angle augmente (l'animal soulève sa patte), les contraintes exercées à l'arrière de la sétule rompraient ses liens avec le substrat et la libéreraient. Ainsi, la patte du gecko serait le premier adhésif « programmable » connu : des étapes de précharge et de traction activent et modulent l'adhérence ; l'ouverture à 30 degrés la désactive.

Le mystère de la structure des sétules a été percé avec l'avènement de la microscopie électronique ; celui des mécanismes d'adhérence a été plus ardu à résoudre. En 1900, l'Allemand Anton Haase a été le premier à proposer que les geckos collent grâce à des forces intermoléculaires. On sait



aujourd'hui qu'il avait raison, mais au cours des 175 dernières années, pas moins de sept mécanismes ont été avancés. Tour à tour, les hypothèses ont été éliminées.

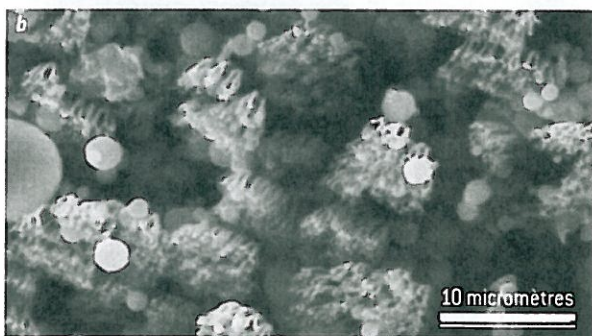
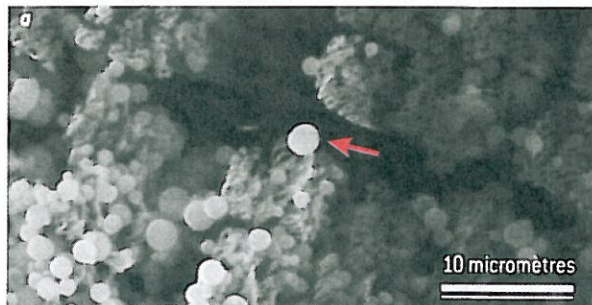
Par exemple, la patte des geckos est dépourvue de tissu glandulaire, aussi l'idée de sécrétions collantes a-t-elle été rapidement écartée. L'hypothèse du frottement a également été repoussée, car, par définition, le frottement n'agit que parallèlement au support ; par conséquent, elle ne peut pas expliquer la capacité des geckos à se tenir au plafond, où la pesanteur est perpendiculaire au support. L'hypothèse selon laquelle les pelotes digitales agissent comme des ventouses a été plus difficile à mettre en défaut. Ce fut fait en 1934, quand l'Allemand Wolf-Dietrich Dellit publia ses résultats : dans le vide, les doigts des geckos restaient collés, mettant définitivement à mal un mécanisme de succion. Pourtant, l'idée est restée longtemps vivace dans la littérature de vulgarisation.

L'hypothèse des forces intermoléculaires est revenue sur le devant de la scène grâce à Rodolfo Ruibal et Valerie Ernst, de l'Université de Riverside. Ils furent les premiers à décrire la structure spatulée de la pointe des sétules grâce au microscope électronique, en 1965. Ils en déduisirent que les spatules ne fonctionnent probablement pas comme les pointes des chaussures d'alpinisme, et postulèrent que les spatules se posent à plat contre le substrat, augmentant ainsi la surface de contact, quand la sétule est engagée (après la précharge).

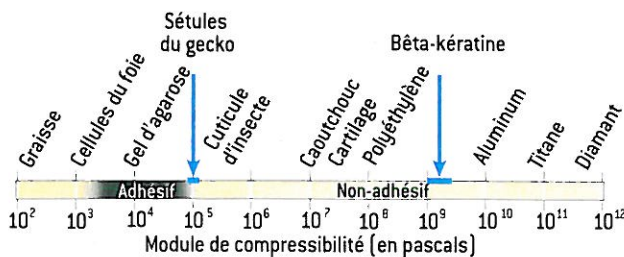
Le tournant décisif fut une série d'expériences menées par Uwe Hiller, de l'Université de Münster, à la fin des années 1960 et au début des années 1970. Ce chercheur montra que les



5. La forte adhérence entre la surface hydrophobe des doigts du gecko tokay et la surface hydrophobe très lisse de l'arséniure de gallium prouve que les forces de Van der Waals suffisent à assurer l'adhérence du gecko.



6. Les pattes des geckos sont autonettoyantes. Quand elles sont salies par des billes de cinq micromètres de diamètre [a, la flèche rouge indique une bille adhérant à plusieurs spatules], la plupart des débris disparaissent (b) après quatre pas sur du verre propre.



7. Le module de Young décrit la rigidité d'une substance. Bien que le module de compressibilité (une quantité associée au module de Young) de la bêta-kératine massive soit d'environ deux milliards de pascals, le module des sétules est plus de 10 000 fois inférieur; au-dessous, les substances sont adhésives (et stables), tandis qu'au-dessus, elles ne sont pas adhésives. Les sétules du gecko sont à la limite des deux domaines. Cette valeur autorise une adhérence forte et rapide tout en évitant un attachement spontané ou inapproprié.

propriétés chimiques du substrat, plutôt que sa texture, déterminent l'intensité de l'attachement des geckos. Restait à déterminer quelles forces intermoléculaires sont en jeu.

Plusieurs types de forces s'exercent entre les molécules. De nombreux insectes, amphibiens et mammifères utilisent des forces capillaires pour se coller aux surfaces (ces forces solidarisent deux plaques de verre accolées quand une goutte d'eau est piégée entre elles). Et bien que les pattes des geckos soient dépourvues de glandes sécrétrices, l'adhérence capillaire est possible, car on trouve des molécules d'eau sur les surfaces hydrophiles polaires dans les conditions d'humidité ambiante. Hiller avait mis en évidence que les geckos n'adhèrent pas au Téflon (le polytétrafluoroéthylène) : cette observation est compatible avec l'hypothèse capillaire, puisque le Téflon qui est apolaire et hydrophobe ne retient pas les molécules d'eau. De fait, les forces adhésives des geckos diminuant à mesure que la surface est plus hydrophobe, la polarité de la surface pourrait expliquer l'adhérence *via* des forces capillaires.

Autre explication possible : les forces de Van der Waals. Ces forces, qui dépendent de la distance entre deux surfaces, augmentent avec la polarisabilité des deux surfaces, c'est-à-dire la capacité de leurs nuages électroniques à se déformer. Le Téflon est apolaire, mais très polarisable, de sorte la non-adhérence du gecko sur le Téflon pourrait être due aussi bien à l'absence de forces capillaires qu'à celle de forces de Van der Waals.

Van der Waals et rien d'autre

Ce n'est qu'en 2002 que la nature précise de l'adhérence a été élucidée. Avec Ann Peattie, à l'Université de Berkeley, nous avons réanalysé les données de Hiller afin de tester l'hypothèse selon laquelle les forces de Van der Waals suffiraient aux geckos. Pour les calculs, nous nous sommes concentrés sur deux paramètres : l'hydrophobie et l'énergie d'adhérence. Cette dernière rend compte de la géométrie et de la chimie de la surface. L'hydrophobie est mesurée par l'angle de contact de l'eau (notée θ) avec la surface. Plus une surface est hydrophobe, plus l'eau se regroupe en gouttes : des valeurs de θ supérieures à 90 degrés indiquent des surfaces hydrophobes. En étudiant la relation entre l'hydrophobie et l'énergie d'adhérence, nous avons montré que les forces adhésives n'augmentent pas sur les surfaces hydrophiles (et donc polaires), ce qui est en accord avec l'hypothèse des forces de Van der Waals.

Depuis, plusieurs tests ont tranché. Nous avons découvert que la surface des sétules est notablement hydrophobe (θ est égal à 160,9 degrés), probablement à cause des acides aminés hydrophobes qui constituent la bêta-kératine, le principal constituant des sétules. Ainsi, ces derniers interagiraient essentiellement par des forces de Van der Waals, que de l'eau soit présente ou non.

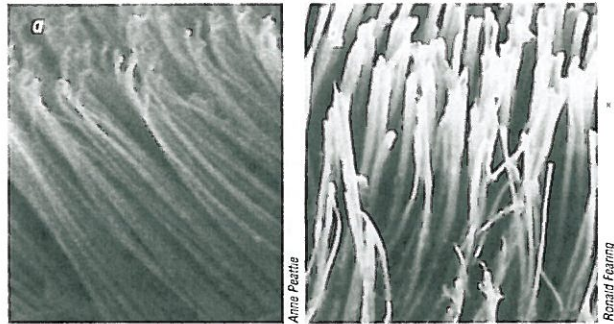
Nous avons aussi mesuré l'adhérence et le frottement des sétules sur deux surfaces polarisables : l'arséniure de gallium (AsGa) et le dioxyde de silicium (SiO₂). Si l'adhérence capillaire domine, alors les doigts des geckos devraient coller au dioxyde de silicium hydrophile, mais pas à l'arséniure de gallium hydrophobe. En revanche, si les forces de

Van der Waals suffisent, alors les geckos devraient adhérer aux deux types de surfaces: c'est bien ce que nous avons observé avec des geckos vivants (voir la figure 5), les contraintes de cisaillement étant semblables dans les deux cas.

L'adhérence des sétules est forte sur des surfaces, qu'elles soient polaires ou non, probablement du fait de l'extrême hydrophobie des sétules elles-mêmes, et sans doute en raison de la très grande surface de contact du réseau de spatules. Cependant, cette indépendance n'interdit pas un rôle de l'eau dans certaines conditions, car elle modifie la géométrie du contact et les énergies d'adhérence entre surfaces hydrophobes et hydrophiles.

C'est ainsi qu'en 2005, l'équipe de Pavel Neuzil, de l'Institut de génie biologique et de nanotechnologie de Singapour, remet l'hypothèse de l'adhérence capillaire sur le devant de la scène en montrant que les spatules des geckos adhèrent mieux en atmosphère humide qu'en atmosphère sèche. Cette interprétation est en contradiction avec l'extrême hydrophobie des sétules de gecko...

Eduard Arzt et ses collègues de l'Institut Max Planck pour la recherche sur les métaux, à Stuttgart, ont clos le débat. Quand l'air est sec, l'adhérence est déjà importante, et elle augmente avec l'humidité. Pourtant, aucun pont capillaire (les médiateurs des forces capillaires) n'a été détecté: même quand l'hygrométrie est élevée, il n'y a pas plus de deux couches de molécules d'eau entre les surfaces, ce qui est insuffisant pour former des ponts capillaires. Ainsi, les molécules d'eau augmenteraient le nombre



8. Des adhésifs artificiels sont inspirés par leurs homologues biologiques. Ainsi, les soies (a) du lézard anole chevalier (*Anolis equestris*) sont non ramifiées et se terminent par des spatules. Le réseau de fibres de polyimide (b) a une structure équivalente.

de liaisons de Van der Waals, celles-ci restant les seules forces en jeu dans l'adhérence du gecko.

Paradoxalement, les pattes des geckos elles-mêmes seraient antiadhésives. Les sétules ne collent pas spontanément aux surfaces; leur attachement est le fait d'une sorte de programme mécanique (pression et traction). De plus, quand on les presse les unes sur les autres, les sétules ne collent pas. Enfin, elles ne se salissent pas.

Comment les pieds collants des geckos restent-ils propres alors qu'ils sont toujours en contact avec des poussières (sable, débris, pollen...)? Les insectes, confrontés au même problème, passent beaucoup de temps à curer leurs cousinets adhésifs souillés. À l'inverse, les geckos ne toilettent

Table ronde organisée par l'**École normale supérieure**
et par **Pour la Science**
Animée par **Bénédicte Leclercq**, *Pour la Science*

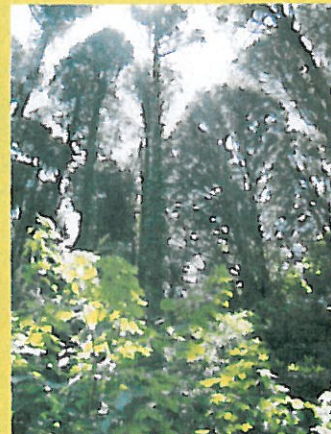
Le développement durable

le 25 avril 2006 à 18 heures,
Salle Dussane à l'ENS, 45 rue d'Ulm Paris 75005

Deux aspects majeurs du développement durable seront abordés : le réchauffement climatique et la biodiversité. Des experts scientifiques et des économistes feront le point sur ce sujet en soulignant l'impact des activités humaines.

avec **Jacques Blondel**, biologiste
à l'Institut français de la biodiversité
Jean-Claude Hourcade, économiste au CNRS,
Sylvie Joussaume, climatologue au CNRS et
Claude Kergomard, géographe à l'ENS.

Entrée libre dans la limite des places disponibles



POUR LA
SCIENCE

normale sup⁶

Juliette Roussel-ENS diffusion des savoirs

pas leurs pattes. Pourtant, bien que certaines plantes et certains animaux s'autonettoient (avec des gouttelettes d'eau), aucun adhésif autonettoyant n'a encore été décrit.

Nous avons étudié ce phénomène en appliquant des microbilles de cinq micromètres de diamètre sur les pattes de geckos (voir la figure 6). Ces billes diminuent bien l'adhérence du gecko, mais il ne faut à l'animal que quatre pas sur une surface de verre propre pour pouvoir à nouveau soutenir son poids par un seul doigt. Les débris collent au verre, pas aux sétules ! La clef semble être l'énergie d'adhérence.

Pour se débarrasser des débris, l'énergie d'adhérence de toutes les sétules collant à une bille doit être égale ou inférieure à l'énergie d'adhérence entre la bille et la surface : en d'autres termes, la bille doit adhérer plus à la surface qu'aux pattes. La forme des sétules participe à cette sélectivité de l'adhérence. Les microbilles n'adhèrent aux pattes que par deux ou trois sétules, et ce en l'absence de précharge : en conséquence, la surface de contact est notablement inférieure à celle entre la microbille et le verre ; l'adhérence privilégiée est donc celle de la bille avec le verre.

Un dispositif autonettoyant

Au repos, les brins des sétules sont incurvés vers le corps et les spatules sont désorganisées. Cet arrangement expliquerait pourquoi l'état par défaut (sans aucune pression exercée) des doigts de gecko n'est pas collant. En revanche, quand la patte est posée, les sétules s'aplatissent et mettent les spatules en contact avec le substrat, augmentant leur surface et donc leur adhérence.

La déformation d'une substance est dictée par sa rigidité ou son élasticité, caractérisée par une quantité nommée module de Young, et mesurée en pascals. Des valeurs élevées correspondent à des matériaux rigides, tel le diamant (10^{12} pascals) ; les cellules graisseuses ont des valeurs parmi les plus basses (100 pascals). La bêta-kératine massive (c'est-à-dire non filamenteuse) est assez dure, avec un module de Young compris entre 1,3 et 2,5 milliards de pascals.

Par contraste, un adhésif sensible à la pression, comme ceux utilisés dans les papiers repositionnables, est constitué de matériau mou collant : il se déforme pour augmenter la surface de contact et a un module de Young inférieur à 100 000 pascals. Ces adhésifs peuvent s'attacher et se détacher plusieurs fois sans laisser de résidus parce qu'ils fonctionnent grâce à des forces intermoléculaires faibles. Cependant, ils bougent, se dégradent, collent sur eux-mêmes et se salissent.

Comment les sétules peuvent-elles fonctionner comme adhésif alors que la bêta-kératine qui les constitue est aussi rigide ? La réponse est dans leur structure fine. R. Fearing a élaboré un modèle mathématique où les sétules sont représentées par de minuscules filaments flexibles (dont une extrémité est fixée, et l'autre libre). Ces filaments, qui fonctionnent comme des ressorts, ont un module de Young notablement inférieur à celui de la bêta-kératine massive dont ils sont constitués. Des expériences récentes ont révélé un module égal à environ 100 000 pascals dans des réseaux isolés de geckos tokay. Cette valeur correspond à la limite supérieure de ce qui est mesuré pour un matériau adhésif.

La hiérarchie des structures digitales des geckos leur confère un module faible et donc certaines propriétés des

substances adhésives en leur épargnant les inconvénients. La combinaison de la robustesse (de la bêta-kératine) et de la souplesse (des spatules et des sétules) autorise une utilisation répétitive et intensive de l'adhésif, sans glissement ni dégradation. En outre, puisqu'ils nécessitent une déformation mécanique pour adhérer, les doigts ne se collent pas les uns aux autres ni ne se salissent.

L'inspiration vient des geckos

Les ingénieurs ne pouvaient manquer des propriétés aussi remarquables, et il n'est guère surprenant qu'ils cherchent à s'en inspirer (voir la figure 8). Pour les nanotechnologies en plein essor, de tels produits seraient précieux pour soulever, déplacer et aligner des capteurs, des moteurs et des circuits miniatures. À plus grande échelle, par exemple pour des robots qui exploreraient un bâtiment effondré ou la surface d'une autre planète, les sétules artificielles doteraient ces machines d'une liberté de mouvement sans précédent. C'est la fin annoncée des vis, colles et autres dispositifs d'emboîtement. Plus anecdotiques, des adhésifs imitant les doigts des geckos révolutionneraient l'escalade. Cette dernière idée n'est pas nouvelle : Shivaji, un raja marathe du XVII^e siècle, aurait utilisé des lézards pour escalader une falaise abrupte et lancer une attaque surprise sur le camp ennemi ! Les progrès sont indéniables, mais les performances des sétules artificielles restent encore très en deçà de celles des geckos. Les coefficients d'adhérence (le rapport de la force d'adhérence sur la force de précharge) des meilleurs valent moins de un pour cent du coefficient des sétules de gecko !

En 2005, un tapis de nanotubes de carbone a été mis au point : sa force adhésive est supérieure à celle des sétules de gecko, mais il ne fonctionne qu'à l'échelle du nanomètre, alors que les doigts des geckos sont utilisables à l'échelle du centimètre. Avec les progrès – indispensables – de la connaissance de l'adhérence des geckos, nous serons peut-être un jour en mesure d'élaborer des matériaux plus performants. Cependant, de nombreuses questions restent ouvertes. Quel est l'effet de la rugosité sur le frottement et l'adhérence ? Comment mieux modéliser les contributions hiérarchisées des spatules, des sétules, des scansors, des doigts et des pattes ? Comment fonctionnent les spatules et les sétules chez les autres espèces de geckos (leur nombre dépasse le millier) ? Quelle est la structure moléculaire des sétules ? Les réponses sont la clef du développement d'adhésifs avec lesquels, nous-mêmes, nous pourrions suivre les geckos aux plafonds...

Nous remercions la revue *American Scientist* de nous avoir autorisés à publier cet article.

Kellar AUTUMN est professeur de biologie au Collège Lewis & Clarke de Portland, dans l'Oregon, aux États-Unis.

K. AUTUMN, S. HSIEH, D. DUDEK, J. CHEN, C. CHITAPHAN et R. FULL, *Dynamics of geckos running vertically*, in *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, pp. 260-272, 2006.

W. HANSEN et K. AUTUMN, *Evidence for self-cleaning in gecko setae*, in *PNAS*, vol. 102, pp. 385-389, 2005.